



Forschungsberichte
aus
dem Institut
für Höchstfrequenztechnik
und Elektronik
der
Universität Karlsruhe

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. W. Wiesbeck

Martin W. Döttling

**Strahlenoptisches
Wellenausbreitungsmodell
und Systemstudien für den
Satellitenmobilfunk**

Band 26

Copyright: Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik
 Universität Karlsruhe (TH), 2000

alle Rechte vorbehalten

Druck: Druckerei Gunter Dünnbier, 02779 Großschönau,
 Tel. 035841-36757

ISSN: 0942-2935

Vorwort des Herausgebers

Vor ca. 10 Jahren waren Satellitenkommunikationssysteme der Wunschtraum aller Mobilfunkbetreiber. Sie ermöglichen weltumspannende Kommunikation ohne terrestrische Infrastruktur. Damit kann die Versorgung auf den Weltmeeren und in dünnbesiedelten Landflächen erreicht werden. Mit dem Satellitenkommunikationssystem Iridium stand 1999, abgesehen von Inmarsat, erstmals ein derartiges System zur Verfügung. Nach kurzem operativen Betrieb wurde es abgeschaltet und soll neuesten Meldungen zufolge zerstört werden. Warum? Die versprochene Leistungsfähigkeit kann nicht gehalten werden. Ursachen sind u. a. die mangelnde Systemsimulation und daraus resultierend die realistische Abschätzung der Leistungsfähigkeit. Diese Erfahrungen lehren eindringlich, dass insbesondere für Satellitenkommunikationssysteme leistungsfähige Planungswerkzeuge und umfangreiche Simulationen für eine erfolgreiche Systemkonzeption erforderlich sind.

Die Arbeit von Herrn Dipl.-Ing. Döttling hatte zum Ziel, ein Werkzeug für ein realistisches Satellitenfunkkanalmodell zu erstellen. Es sollte Systemsimulationen und vergleichende Beurteilungen auf der Basis aller relevanten Parameter ermöglichen. Damit könnte heute genau jene Lücke geschlossen werden, welche u. a. zum Misserfolg bei Iridium führte.

Die Untersuchung basiert auf einem strahlenoptischen Wellenausbreitungsmodell. Die Verbindung wird auf der Basis statistisch verteilter Hindernisse in der Umgebung des mobilen Empfängers untersucht. In Abschnitt 4 wird damit der Satellitenmobilfunkkanal charakterisiert mit schmalbandigen und breitbandigen Analysen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 5 durch Messungen stationär, in ländlichen und in suburbanem Gebiet mobil verifiziert. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auch Polarisationsdiversity gemessen. In Abschnitt 6 werden aus den vorangegangenen Ergebnissen Strategien zur Erhöhung der Dienstqualität und in Abschnitt 7 Systemstudien durchgeführt. Schwerpunkte sind hierbei Diversity (Satelliten-, Polarisations-), Leistungsregelung und Handover. Hierfür wird insbesondere das effektive Bitenergie-zu-Rauschleistungsdichteverhältnis verwendet.

In Zusammenarbeit mit Projektpartnern sind umfangreiche Datenbanken, z.B. Landnutzungsklassen entstanden. Die Landnutzungsklassen sind auf einem hierarchischen System aufgebaut und für vielfältige weitere Untersuchungen verwendbar.

Prof. Dr.-Ing. Werner Wiesbeck

- Institutsleiter -

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Werner Wiesbeck

- Band 1 Daniel Kähny
Modellierung und meßtechnische Verifikation polarimetrischer, mono- und bistatischer Radarsignaturen und deren Klassifizierung
- Band 2 Eberhardt Heidrich
Theoretische und experimentelle Charakterisierung der polarimetrischen Strahlungs- und Streueigenschaften von Antennen
- Band 3 Thomas Kürner
Charakterisierung digitaler Funksysteme mit einem breitbandigen Wellenausbreitungsmodell
- Band 4 Jürgen Kehrbeck
Mikrowellen-Doppler-Sensor zur Geschwindigkeits- und Wegmessung - System-Modellierung und Verifikation
- Band 5 Christian Bornkessel
Analyse und Optimierung der elektrodynamischen Eigenschaften von EMV-Absorberkammern durch numerische Feldberechnung
- Band 6 Rainer Speck
Hochempfindliche Impedanzmessungen an Supraleiter / Festelektrolyt-Kontakten
- Band 7 Edward Pillai
Derivation of Equivalent Circuits for Multilayer PCB and Chip Package Discontinuities Using Full Wave Models
- Band 8 Dieter J. Cichon
Strahlenoptische Modellierung der Wellenausbreitung in urbanen Mikro- und Pikofunkzellen
- Band 9 Gerd Gottwald
Numerische Analyse konformer Streifenleitungsantennen in mehrlagigen Zylindern mittels der Spektralbereichsmethode
- Band 10 Norbert Geng
Modellierung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in Funksystemen durch Lösung der parabolischen Approximation der Helmholtz-Gleichung

- Band 11 Torsten C. Becker
Verfahren und Kriterien zur Planung von Gleichwellennetzen für den Digitalen Hörrundfunk DAB (Digital Audio Broadcasting)
- Band 12 Friedhelm Rostan
Dual polarisierte Microstrip-Patch-Arrays für zukünftige satelliten-gestützte SAR-Systeme
- Band 13 Marcus Demmler
Vektorkorrigiertes Großsignal-Meßsystem zur nichtlinearen Charakterisierung von Mikrowellentransistoren
- Band 14 Andreas Froese
Elektrochemisches Phasengrenzverhalten von Supraleitern
- Band 15 Jürgen v. Hagen
Wide Band Electromagnetic Aperture Coupling to a Cavity: An Integral Representation Based Model
- Band 16 Ralf Pötzschke
Nanostrukturierung von Festkörperflächen durch elektrochemische Metallphasenbildung
- Band 17 Jean Parlebas
Numerische Berechnung mehrlagiger dualer planarer Antennen mit koplanarer Speisung
- Band 18 Frank Demmerle
Bikonische Antenne mit mehrmodiger Anregung für den räumlichen Mehrfachzugriff (SDMA)
- Band 19 Eckard Steiger
Modellierung der Ausbreitung in extrakorporalen Therapien eingesetzter Ultraschallimpulse hoher Intensität
- Band 20 Frederik Küchen
Auf Wellenausbreitungsmodellen basierende Planung terrestrischer COFDM-Gleichwellennetze für den mobilen Empfang
- Band 21 Klaus Schmitt
Dreidimensionale, interferometrische Radarverfahren im Nahbereich und ihre meßtechnische Verifikation

- Band 22 Frederik Küchen, Torsten C. Becker, Werner Wiesbeck
Grundlagen und Anwendungen von Planungswerkzeugen für den digitalen terrestrischen Rundfunk
- Band 23 Thomas Zwick
Die Modellierung von richtungsaufgelösten Mehrwegegebäudefunkkanälen durch markierte Poisson-Prozesse
- Band 24 Dirk Didascalou
Ray-Optical Wave Propagation Modelling in Arbitrarily Shaped Tunnels
- Band 25 Hans Rudolf
Increase of Information by Polarimetric Radar Systems
- Band 26 Martin Döttling
Strahlenoptisches Wellenausbreitungsmodell und Systemstudien für den Satellitenmobilfunk

Für Sylvia und Lea

Strahlenoptisches Wellenausbreitungsmodell und Systemstudien für den Satellitenmobilfunk

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

von der Fakultät für
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Fridericiana Karlsruhe
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Martin W. Döttling
aus Oppenau

Tag der mündlichen Prüfung:

22. Mai 2000

Hauptreferent:

Prof. Dr.-Ing. Werner Wiesbeck

Korreferent:

Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Jondral

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe. Mein besonderer Dank gebührt dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Wiesbeck, der als Hauptreferent diese Arbeit konstruktiv und wohlwollend begleitet hat. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Jondral vom Institut für Nachrichtentechnik der Universität Karlsruhe für die Übernahme des Korreferats.

Das außerordentlich gute Arbeitsklima am Institut und die Hilfsbereitschaft aller Mitarbeiter haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Besonders herzlich danke ich den Herren Dr.-Ing. Dirk Didascalou und Dr.-Ing. Norbert Geng für die mühevollen und kritische Durchsicht des Manuskripts.

Ferner möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des Auftrags *Land Mobile Satellite Propagation Model for Non-Urban Areas* der europäischen Raumfahrtagentur ESA bei allen beteiligten Kollegen bedanken. Ein ganz herzliches Dankeschön geht dabei an Herrn Dr.-Ing. Axel Jahn vom Institut für Nachrichtentechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen, der mir stets als kompetenter Ansprechpartner zur Verfügung stand und durch die Bereitstellung von Meß- und Geländedaten die Verifikation meiner Arbeit erst ermöglichte. Besonderen Dank gilt auch den Herren Dr. Simon Saunders and M. Eng. Stephen Leach vom Centre for Communication System Research (CCSR) der University of Surrey, Guildford, Großbritannien für die Bereitstellung der polarimetrischen Messdaten.

Nicht zuletzt bedanke ich mich von Herzen bei meiner Frau Sylvia und meiner Tochter Lea. Durch sie habe ich sehr viele wichtige Hilfestellungen – ganz anderer Art – und permanente Unterstützung in dieser Zeit erfahren.

Karlsruhe, im Mai 2000

Martin W. Döttling

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Umfeld der Arbeit	1
1.2 Aufgabenstellung	4
1.3 Lösung und Gliederung der Arbeit	5
2 Modellierung der Ausbreitungssituation	9
2.1 Verwendete Koordinatensysteme	9
2.2 Die Ausbreitungsumgebung	10
2.2.1 Topographie und Landnutzung	11
2.2.2 Statistische Generierung von Hindernissen	12
2.2.3 Der Mobilteilnehmer	13
2.3 Die Satellitensysteme	13
2.4 Zusammenfassung	15
3 Strahlenoptisches Wellenausbreitungsmodell	17
3.1 Suche der Ausbreitungspfade	18
3.1.1 Projektion der Objekte am Straßenrand	19
3.1.2 Der modifizierte Sweep-Line Algorithmus	20
3.1.3 Bestimmung der Interaktionspunkte	22
3.1.4 Profilerstellung und Sichtprüfung	26

3.1.5	Berücksichtigte Ausbreitungspfade	29
3.2	Physikalische Ausbreitungsrechnung	30
3.2.1	Transformation in eine zirkulare Polarisationsbasis . .	31
3.2.2	Reflexion	33
3.2.3	Streuung	35
3.2.4	Kanten- und Eckenbeugung	39
3.2.5	Vegetationsdämpfung	41
3.3	Zusammenfassung	42
4	Charakterisierung des Satellitenmobilfunkkanals	43
4.1	Schmalbandige Analyse	43
4.2	Breitbandige Analyse	46
4.2.1	Die zeitvariante Kanalimpulsantwort	46
4.2.2	Die Streufunktion	49
4.2.3	Zeitvarianz des Kanals und Abtastrate der Simulation	51
5	Verifikation des Ausbreitungsmodells	55
5.1	Vergleich von zwei- und dreidimensionaler Modellierung . . .	56
5.2	Vergleiche bei stationärem Empfänger	59
5.3	Vergleich mit Überlandfahrten	63
5.3.1	Verifikation in ländlichem Gebiet	63
5.3.2	Verifikation in suburbanem Gebiet	66
5.4	Vergleich mit polarimetrischen Messungen	71
5.5	Zusammenfassung	77
6	Strategien zur Erhöhung der Dienstqualität	79
6.1	Das effektive Bitenergie-zu-Rauschleistungs-dichte-Verhältnis .	80
6.1.1	Definition des effektiven Bitenergie-zu-Rauschleistungs- dichte-Verhältnisses	80
6.1.2	Repräsentation des Empfangssignals	81

6.1.3	Nutzsignal und Intersymbolinterferenz	83
6.1.4	Interferenz durch Mehrfachzugriff	85
6.2	Signalverzögerung	87
6.3	Leistungsregelung	89
6.4	Gesprächsübergabe zwischen Satelliten	92
6.5	Diversity und Signalüberlagerung	95
6.5.1	Signalüberlagerung im Empfänger	95
6.5.2	Satelliten-Diversity	97
6.5.3	Polarisations-Diversity	100
6.6	Vergleichskriterien	100
6.7	Zusammenfassung	103
7	Systemstudien	105
7.1	Der Aufbau der Simulationsreihe	105
7.2	Elevationsabhängigkeit und Leistungsregelung	107
7.3	Gesprächsübergabe zwischen Satelliten	114
7.4	Satelliten-Diversity	118
7.5	Polarisations-Diversity	124
7.6	Vergleich von verschiedenen Systemvarianten	128
7.7	Zusammenfassung	132
8	Zusammenfassung	135
A	Parameter der Landnutzungsklassen	139
B	Stochastische Erzeugung von Hindernissen	143
C	Antennendiagramme	147
	Literaturverzeichnis	149

Liste der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen

BSA	Backscattering Alignment
CCSR	Centre for Communication Systems Research
CDMA	Code Division Multiple Access
COST	Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research
CTDMA	Code Time Division Multiple Access
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
EGC	Equal Gain Combining
EHF	Extremely High Frequency
ESA	European Space Agency
FDD	Frequency Division Duplex
FSA	Forward Scattering Alignment
GEO	Geostationary Earth Orbit (geostationäre Umlaufbahn)
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HEO	Highly Elliptical Orbit (elliptische Umlaufbahnen)
HO	Handover
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEM	Integral Equation Method (for Rough Surface Scattering)
INMARSAT	International Maritime Satellite Organization
ISI	Intersymbolinterferenz
LEO	Low Earth Orbit (niedrige Umlaufbahnen im Bereich von 1000 km)
LMS	Land Mobile Satellite
LOS	Line-of-Sight (Sichtverbindung)

MEO	Medium Earth Orbit (Umlaufbahnen mittlerer Höhe im Bereich von 10000 km)
MAI	Multiple Access Interference (Mehrfachzugriffsinterferenz)
MRC	Maximum Ratio Combining
NLOS	Non Line-of-Sight (Abschattung)
NN	Normal-Null (Meeresspiegel, Bezugsgröße für Höhenangaben)
PC	Power Control (Leistungsregelung)
PSK	Phase Shift Keying
SC	Selection Combining
SHF	Super High Frequency
UHF	Ultra High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTD	Uniform Geometrical Theory of Diffraction (verallgemeinerte geometrische Beugungstheorie)
UTM	Universal Transversal Mercator Projection (geographisches Koordinatensystem)
VHF	Very High Frequency

Mathematische Schreibweisen

a	reelle skalare Größe
\tilde{a}	normierte bzw. relative Größe
$\langle a \rangle$	Erwartungswert von a
\underline{a}	komplexe skalare Größe
\underline{a}^*	konjugiert komplexe Größe
\vec{a}	reeller Vektor
\vec{a}^T	transponierter Vektor
\hat{a}	Einheitsvektor
$\vec{a} \cdot \vec{b}$	Skalarprodukt
$\vec{a} \times \vec{b}$	Vektorprodukt
$a * b$	Faltung von a und b
$a \& b$	logische UND-Verknüpfung von a und b
$\underline{\vec{a}}$	komplexer Vektor
A	reelle Matrix
A^T	transponierte Matrix
\underline{A}	komplexe Matrix

$\hat{e}_R, \hat{e}_H, \hat{e}_Z$	Einheits-Basisvektoren des geographischen kartesischen Koordinatensystems
$\hat{e}_x, \hat{e}_y, \hat{e}_z$	Einheits-Basisvektoren in kartesischen Koordinaten
$\hat{e}_r, \hat{e}_\vartheta, \hat{e}_\psi$	Einheits-Basisvektoren in sphärischen Koordinaten, mathematische Definition
$\hat{e}_r, \hat{e}_\varepsilon, \hat{e}_\alpha$	Einheits-Basisvektoren in sphärischen Koordinaten, geographische Definition
$F_y(y)$	kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen y
$F_x(y)$	kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen x an der Stelle y
$\bar{F}_x(y)$	komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen x an der Stelle y
$M_E \{\vec{x}\}$	Spiegelpunkt des Ortsvektors \vec{x} bezüglich der Fläche E
$P \{\vec{a}\}$	Projektion des Vektors \vec{a}

Großbuchstaben

B	Systembandbreite $B = 1/T_s$
B_N	Rauschbandbreite des Systems
\vec{C}	Antennenrichtcharakteristik
D_v	Zusatzdämpfung beim Durchdringen einer Vegetationsschicht
\underline{E}	komplexe Amplitude der elektrischen Feldstärke
E_b	Bitenergie
E_b/N_0	Bitenergie-zu-Rauschleistungsdichte-Verhältnis
$\bar{F}_{\tilde{P}_x}(\Delta t)$	komplementäre kumulative Verteilungsfunktion der Dauer von Pegeleinbrüchen (engl. <i>time share of fades</i>)
G	Antennengewinn
G_p	Prozessgewinn in CDMA-Systemen
$\underline{H}(f)$	Übertragungsfunktion
L_r	Korrelationslänge einer rauen Oberfläche
$M_i(t)$	Anzahl der sichtbaren Satelliten zum Zeitpunkt t
N	Rauschleistung
$N(t)$	Anzahl der Ausbreitungspfade zum Zeitpunkt t
N_0	Rauschleistungsdichte
N^{eq}	Anzahl äquivalenter Kanäle
N_p	Anzahl der Punkte einer Simulation
P	Wirkleistung

P_{LOS}	verfügbare Empfangsleistung bei Freiraumausbreitung und isotropen Antennen
R	Fresnel'scher Reflexionskoeffizient
R_A	Ausfallrate einer Verbindung
R_c	Code-Rate
R_E	mittlerer äquatorialer Erdradius $R_E \approx 6370$ km
R_{HO}	Handover-Rate
R_K	Rate der Kontrollkommandos
R^{mod}	modifizierter Fresnel'scher Reflexionskoeffizient
$R_{\tilde{P}_x}(\tilde{P}_R)$	Überschreitungsrate des Pegels \tilde{P}_x (engl. <i>level crossing rate</i>)
S	Nutzsignalleistung
SNR	Signal-zu-Rauschleistungs-Verhältnis (engl. <i>signal-to-noise ratio</i>)
$\Delta SNR_{+,-}$	Pegeldifferenz für den Aufbau bzw. Abbau einer Satelliten-Diversity-Verbindung
ΔSNR_{HO}	Pegeldifferenz für die Einleitung einer Gesprächsübergabe
T	Temperatur
T_b	Bitdauer
T_c	Chipdauer
\underline{T}_i	Übertragungsmatrix für Pfad i
T_k	Köhärenzzeit des Kanals
T_s	Symboldauer
T_{Sys}	Systemrauschtemperatur
\underline{V}	Spannung
$W(x)$	Wahrscheinlichkeit von x
\underline{Z}_A	Antennenimpedanz

Kleinbuchstaben

\underline{a}	Ausbreitungskoeffizient
b_i	Gewichtungsfaktor bei Signalüberlagerung
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 2,997925 \cdot 10^8$ m/s
d	Abstand
d_p	Abstand der Projektionsebenen vom Projektionszentrum
f	Frequenz
f_D	Dopplerfrequenz
f_r	Relaxationsfrequenz

$\underline{h}(t)$	Impulsantwort
$\underline{h}(\tau, t)$	zeitvariante Impulsantwort
$\underline{h}(\tau, f_D)$	Streufunction
h_a	Höhe der Antenne des Mobilteilnehmers über Grund
h_s	Fußpunkthöhe der Satellitenbahn
h_v	mittlere Schichthöhe der Landnutzungs-klasse
i	allgemeine ganzzahlige Zählvariable
j	allgemeine ganzzahlige Zählvariable
k	Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
m	allgemeine ganzzahlige Zählvariable
n	allgemeine ganzzahlige Zählvariable
r	Radius, Entfernung
\underline{s}	Sendesymbol
t	allgemeine Zeitvariable
\tilde{t}_A	relative Ausfallzeit einer Verbindung
t_p	Signalverarbeitungszeit
$\langle t_{\tilde{P}_x}(\tilde{P}_R) \rangle$	mittlere Schwunddauer für $\tilde{P}_R < \tilde{P}_x$ (engl. <i>average fade duration</i>)
$t_{\ddot{u}}$	Signallaufzeit auf der Übertragungsstrecke
Δt_{Ges}	Gesamtsimulationszeit
Δt_m	Mittelungsdauer zur Bestimmung des Ist-Wertes der Leistungsregelung
Δt_{PC}	Zeit zwischen zwei Befehlen der Leistungsregelung
Δt_s	Signalverzögerung
Δt_u	Zeitintervall zwischen der Übermittlung der <i>SNR</i> -Messungen
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor

Griechische Buchstaben

α	geographischer Azimutwinkel (bzgl. Nord, mathematisch negative Orientierung)
β	freier Parameter (engl. <i>roll-off factor</i>) bei Nyquistfilterung
β	Winkel zwischen Strahl und Beugungskante
γ	Leistungsregelungsfaktor
$\delta(x)$	Dirac-Impuls
$\delta(x, y)$	Kronecker-Symbol $\delta(x, y) = 1$ für $x = y$, $\delta(x, y) = 0$ sonst

ε	Elevationswinkel
$\underline{\varepsilon}$	Permittivität
ε_0	Permittivität des Vakuums $\varepsilon_0 = 8,85419 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$
$\underline{\varepsilon}_r$	relative Permittivität
ε_{r0}	Niederfrequenzwert der Permittivität
$\varepsilon_{r\infty}$	Hochfrequenzwert der relativen Permittivität
ζ	empirische Konstante für Vegetationsdämpfung
η	Verlustfaktor
ϑ	Poldistanzwinkel
κ	elektrische Leitfähigkeit
λ	Wellenlänge
$\underline{\mu}$	Permeabilität
μ_0	Permeabilität des Vakuums $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
ν	empirische Konstante für Vegetationsdämpfung
ξ	empirische Konstante für Vegetationsdämpfung
ρ	Orthogonalitätsfaktor bei Mehrfachzugriffsinterferenz
σ	Standardabweichung
σ_r	Standardabweichung der Höhe einer rauen Oberfläche
σ^0	normierter (flächenbezogener) Radarstreuquerschnitt
τ	Verzögerungszeit
$\tilde{\tau}_{HO}$	relative Verzögerungszeit bei Gesprächsübergaben
ϕ	Erhebungswinkel gegenüber einer Oberfläche
ψ	mathematischer Azimutwinkel (bzgl. x-Achse, mathematisch positive Orientierung)
ω	Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$

Indizes

A	Ausfall
b	Satellitenzelle (engl. <i>beam</i>)
BS	Bodenstation
c	Eckenbeugung (engl. <i>corner diffraction</i>)
c	kohärent (engl. <i>coherent</i>)
d	Vorwärtsverbindung vom Satellit (engl. <i>downlink</i>)
E	Erde
Ges	Gesamt
i	Index des Punktes in der Simulation

i	einfallender Strahl (engl. <i>incident</i>)
inc	inkohärent (engl. <i>incoherent</i>)
K	Ausbreitungskanal
L	linkszirkulare Polarisisation
M	Mobilteilnehmer
max	maximal
min	minimal
p	parallele Polarisisation
R	Empfänger (engl. <i>receiver</i>)
R	rechtszirkulare Polarisisation
s	senkrechte Polarisisation
s	gestreuter bzw. ausfallender Strahl (engl. <i>scattered</i>)
S	Satellit
Sys	Übertragungssystem
T	Sender (engl. <i>transmitter</i>)
u	Rückwärtsverbindung vom Mobilteilnehmer (engl. <i>uplink</i>)
w	Kantenbeugung (engl. <i>wedge diffraction</i>)
Z	Zielwert, Sollwert
0	Träger

Frequenzbänder

VHF	30 MHz–300 MHz
UHF	300 MHz–3 GHz
SHF	3 GHz–30 GHz
EHF	30 GHz–300 GHz
L-Band	1 GHz–2 GHz
S-Band	2 GHz–4 GHz
C-Band	4 GHz–8 GHz
X-Band	8 GHz–12 GHz
Ku-Band	12 GHz–18 GHz
K-Band	18 GHz–27 GHz
Ka-Band	27 GHz–40 GHz

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Umfeld der Arbeit

Von zukünftigen Funkkommunikationssystemen werden vor allem die Integration verschiedenster Dienste, die Übertragung hoher Datenraten zu mobilen Teilnehmern sowie weltweite Erreichbarkeit verlangt. Die Implementierung dieser dritten Generation von Mobilfunksystemen wird in den dichtbesiedelten und wohlhabenden Industrieländern vor allem durch die Entwicklung neuer (z. B. Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) und die Migration bestehender terrestrischer Funksysteme (z. B. Global System for Mobile Communications, GSM) erreicht. Die letzte Maxime jedoch – die globale Verfügbarkeit – ist ohne Satellitenfunk undenkbar. Eine terrestrische Versorgung ist in dünnbesiedelten oder schwer zugänglichen Gebieten ökonomisch nicht realisierbar. Zudem besteht für Satellitensysteme die Möglichkeit, ohne merklichen Mehraufwand Kommunikations- und Navigationsdienste zu verbinden. Darüber hinaus bietet die Verwendung von Satellitensystemen in bestimmten Marktsegmenten signifikante Vorteile, wie z. B. im Flottenmanagement oder bei der Versorgung von Katastrophen- und Krisengebieten.

Die Geschichte des Satellitenmobilfunks begann 1976 mit dem maritimen COMSAT/Marifat System im UHF- und L-Band, welches Telefon- und Telefaxdienste von und zu Schiffen bereitstellte. Die weitere Entwicklung der Satellitenmobilkommunikation, auch für Anwendungen zu Lande (engl. *land mobile satellite systems*), wurde maßgeblich von der internationalen INMARSAT-Organisation vorangetrieben [Eva97].

Die frühen Systeme verwendeten geostationäre Satelliten mit nur einer Ausleuchtzone (engl. *footprint*), so dass gerichtete Antennen mit bis zu 1 m Durchmesser am terrestrischen Datenendgerät verwendet werden mussten, um die Ausbreitungsverluste zu kompensieren. Der Weg zu immer kleineren Empfängern – bis hin zu Handgeräten, die nur unmerklich größer als ihre terrestrischen Pendants sind – wird vor allem durch die Verwendung niedrigerer Orbits und durch die Erzeugung von mehreren kleineren Ausleuchtzonen pro Satellit (engl. *spot beams*) ermöglicht. In den letzten Jahren entstanden und entstehen Systeme und Systemvorschläge, die Sprach- und niedriggradige Datendienste von und zu mobilen Handgeräten erlauben [Eva97, Mil98]. Für diese, und in gesteigertem Maße für die zukünftigen breitbandigen Satellitenmobilfunksysteme der dritten Generation, sind mannigfaltige Systementwicklungsaufgaben zu bewältigen. Hierzu gehören:

- Optimierung von Satellitenkonstellationen mit vielen Satelliten in niedriger Umlaufbahn,
- Design von sog. Multibeam-Antennen,
- Signalverarbeitung und Vermittlung im Satellit (engl. *on-board processing*),
- Direktverbindungen von Satellit zu Satellit (engl. *intersatellite links*),
- Gesprächsübergabe zwischen verschiedenen Ausleuchtzonen bzw. Satelliten (engl. *handover*),
- Satelliten-Diversity,
- Kompatibilität mit terrestrischen Systemen und Standards.

Generell erfordern die gestiegenen Ansprüche an Datenrate, Systemkapazität sowie an die Qualität der Sprach- und Datendienste eine gründliche Untersuchung und Optimierung von verschiedenen Strategien zur Erhöhung der Übertragungsqualität. Die Forderung nach einer gründlichen Systemplanung verschärft sich nochmals im Hinblick auf die in Satellitensystemen besonders kostbaren Ressourcen Sendeleistung und Netzkapazität, sowie durch die Tatsache, dass eine Marktakzeptanz vor dem Hintergrund etablierter und „preisgünstiger“ terrestrischer Systeme erkämpft werden muss. Ein Schlüsselkriterium für eine gezielte und umfassende Systemplanung ist die Verwendung eines leistungsfähigen Modells für den Funkkanal.

Bisherige Satellitenfunkkanalmodelle sind überwiegend empirischer und/oder stochastischer Natur. Viele Modelle erlauben nur die Vorhersage der kumulativen Wahrscheinlichkeit des Empfangspegels. Die einfachsten Ansätze verwenden analytische Pegelverteilungen (wie z.B. Lognormal-, Rice- und Rayleigh-Verteilungen), wobei die benötigten Parameter durch Messungen gewonnen werden müssen [Loo85, CV94, GV96, KC96]. Zur Erzeugung von Pegelzeitserien werden auch Markov-Modelle vorgeschlagen [LCD⁺91, BS92, MBS94, PPS⁺97]. Diese Modelle benötigen allerdings eine große Anzahl empirischer Konstanten. Ferner zeigen die resultierenden Zeitserien diskrete mittlere Schwundtiefen mit unphysikalischen abrupten Übergängen. Physikalisch-statistische Ansätze, die eine rein statistische Beschreibung der Umgebung mit physikalischen Ausbreitungsmodellen verbinden [SE97, TES98], bzw. strahlenoptische Ansätze [PVK⁺98, FAH00] sind nur für bebaute Gebiete bekannt, in denen i. d. R. terrestrische Versorgung herrscht.

Die Untersuchung von Satelliten-Diversity erweist sich mit den vorhandenen empirischen Modellen [REE92, Lut96, AV97, KKM97, TSE98] als sehr schwierig, da die Verbundabschattungswahrscheinlichkeiten für mehrere Satelliten sehr stark von der Ausbreitungs Umgebung und der Winkelseparation der Satelliten in Azimut und Elevation abhängen. Für mobile Teilnehmer und nichtgeostationäre Satelliten sind diese Parameter zusätzlich zeitvariant, so dass es praktisch unmöglich ist, genügend Messdaten für einen empirischen Ansatz zu erhalten. Mittlere Korrelationskoeffizienten der Abschattungswahrscheinlichkeit wurden in [VTS⁺00] berechnet. Die Untersuchung beschränkte sich jedoch auf bebautes Gebiet, außerdem zeigte sich eine recht große Schwankungsbreite der Korrelationskoeffizienten, so dass nur pauschale Aussagen über die Abschattungswahrscheinlichkeiten für maximal zwei Satelliten getroffen werden konnten. Der Einfluss der zeitlich veränderlichen Satellitenpositionen, der Signalverzögerung, der Dopplerverschiebung sowie verschiedener Algorithmen zur Diversity-Steuerung auf den erzielbaren Diversity-Gewinn und auf die Systemkapazität wird in keinem der Modelle berücksichtigt.

Bei den wenigen bisher publizierten breitbandigen Kanalmodellen handelt es sich um sog. *tapped delay line*-Modelle [JBH96, PSE96, GPW96], bei denen wiederum die Pfadgewichte und Verzögerungszeiten aus vorhandenen Messdaten abgeleitet werden. Aufgrund dieser empirischen Grundlage ist der Anwendungsbereich dieser Modelle leider ebenfalls eingeschränkt und nicht zur Untersuchung von Satelliten-Diversity geeignet. Zusätzliche Probleme sind hier der begrenzte Dynamikbereich der zugrunde liegenden Messungen

und die mangelhafte zeitliche Auflösung von Mehrwegepfaden, sowie das Fehlen von polarimetrischer Information.

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten der oben genannten Ansätze auf messtechnisch gewonnenen Ausbreitungsdaten beruhen, beinhalten diese Modelle stets auch Einflüsse und Einschränkungen durch die Messsysteme. Die daraus gewonnenen Modelle sind in ihrer Gültigkeit (z. B. hinsichtlich der Umgebung, der Satellitenelevation, der Frequenz usw.) stark eingeschränkt und nicht auf andere Szenarien übertragbar. Als Sendeplattformen werden meist existierende (geostationäre) Satelliten, Hubschrauber oder Flugzeuge verwendet, so dass die Messdaten wesentliche Aspekte des Zielsystems (z. B. zeitvariante Satellitenpositionen, Mehrfachsichtbarkeit und Doppler) nicht oder nur ungenügend berücksichtigen können. Ferner sind solche Messkampagnen sehr aufwendig, langwierig und teuer. Insbesondere für ländliche Gebiete existiert bislang kein Ausbreitungsmodell, das für beliebige Ausbreitungsszenarien Gültigkeit besitzt, eine breitbandige, polarimetrische Funkkanalcharakterisierung erlaubt sowie gleichzeitig die Bewegung des Nutzers und aller sichtbaren Satelliten vollständig berücksichtigt. Eine ausführliche Diskussion von verschiedenen Strategien zur Erhöhung der Dienstqualität unter Berücksichtigung der auftretenden Doppler- und Laufzeiteffekte, der Signalisierungsverzögerung und von polarimetrischen Effekten ist – nach Wissen des Autors – bisher nicht durchgeführt worden.

1.2 Aufgabenstellung

Wellenausbreitungsmodelle für den terrestrischen Mobilfunk werden überwiegend zur Ermittlung des Versorgungsgebiets bzw. zur Sendernetzplanung verwendet. Dort interessieren vor allem flächig berechnete, verlässliche Mittelwerte der Übertragungsdämpfung. Im Gegensatz dazu stehen bei Kanalmodellen für den Satellitenmobilfunk Systemstudien und -planung im Vordergrund. Folglich werden hier zeitlich hochauflösende, physikalisch korrekte und für diese Anwendung typische Zeitserien von Kanalimpulsantworten benötigt. Dabei ist sowohl eine vollständige Beschreibung der Bewegung des Nutzers und aller Satelliten der betrachteten Konstellation als auch eine realistische Modellierung der Umgebung des Teilnehmers unumgänglich.

Mit Hinblick auf den Anwendungszweck, nämlich die Untersuchung verschiedener Systemaspekte, wie z. B. Synchronisation, Modulation, Fehlerschutz,

Entzerrung, Verwürfelung (engl. *interleaving*), Leistungsregelung, Verbindungsübergabe zwischen Satelliten, Satelliten- und Polarisations-Diversity, ergeben sich folgende Anforderungen an das Kanalmodell:

- gleichzeitige Berechnung der zeitvarianten Kanalimpulsantworten aller sichtbaren Satelliten,
- Berücksichtigung von schnellem und langsamem Schwund,
- Erzeugen von stetigen Pegelzeitserien mit Auflösungen im Bereich von Zentimetern bzw. Millisekunden,
- verlässliche Vorhersage von Polarisisationseffekten,
- Simulation des Dopplerverhaltens,
- Berücksichtigung von korrelierten und zeitvarianten Effekten (u. a. Verbundabschattungswahrscheinlichkeit von Satelliten oder des Einflusses der Satellitenelevation auf die Übertragungseigenschaften).

Ferner ist die Gültigkeit des Ansatzes in einem weiten Frequenzbereich erwünscht, um mit einem einzigen Modell mehrere Frequenzbänder der Satellitenkommunikation abzudecken. Für Untersuchungen und Vergleiche verschiedener Strategien zur Erhöhung der Systemverfügbarkeit müssen darüber hinaus spezielle Effekte, hervorgerufen durch verschiedene Geschwindigkeiten des Mobilteilnehmers und durch die merkliche Signallaufzeit, Eingang in die Simulation finden.

1.3 Lösung und Gliederung der Arbeit

Eine vollständige Bearbeitung der Aufgabenstellung ist mit empirischen oder semi-empirischen Ausbreitungsmodellen aufgrund der bereits in Abschnitt 1.1 genannten Probleme nicht möglich. Feldtheoretische Methoden scheiden wegen der vorliegenden Problemkomplexität (z. B. große Entfernungen und Berücksichtigung von Doppler-Effekten) aus. Eine umfassende Lösung der zuvor gestellten Aufgabe ist jedoch mit Hilfe eines geometrisch-optischen Ansatzes zur Kanalmodellierung möglich. Neben der prinzipiellen Gültigkeit dieser Hochfrequenzapproximation in allen relevanten Frequenzbereichen des

Satellitenmobilfunks, bietet die Kombination von strahlenoptischer Ausbreitungsrechnung und einem Orbitgenerator¹ die Möglichkeit, eine breitbandige Beschreibung des Übertragungskanals aller sichtbaren Satelliten gleichzeitig zu erhalten.

Dadurch, dass Mehrwegepfade direkt berechnet werden, sind sowohl langsamer Schwund (durch Abschattung) als auch schneller Schwund (durch Interferenzen) in der Simulation berücksichtigt. Mittels einer geeigneten geometrischen Vorverarbeitung kann sichergestellt werden, dass alle relevanten Ausbreitungspfade gefunden werden, welche dann in der Superposition zu realistischen und kontinuierlichen Pegelzeitserien führen. Die Beschreibung der einzelnen Pfade durch eine vollpolarimetrische Übertragungsmatrix erlaubt eine gezielte Untersuchung von Depolarisationseffekten, die insbesondere bei der in Satellitensystemen oft verwendeten zirkularen Polarisation zu beachten sind. Ferner können Dopplerspektren und Dopplerraten, die in den Satellitennetzen in niedrigen Orbits eine wichtige Rolle spielen, vom Ausbreitungsmodell direkt berechnet werden. Durch die strikte Trennung von Funkkanal- und Systemeigenschaften ist es möglich, mit einer einzigen Ausbreitungsrechnung detaillierte Systemparameterstudien (z.B. bezüglich verschiedener Leistungsregelungsverfahren) durchzuführen.

Dieser Ansatz trägt somit inhärent vielen relevanten Abhängigkeiten und korrelierten Effekten Rechnung, wie z.B. der Korrelation der Abschattungswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Satelliten in Abhängigkeit von ihrer Winkelseparation am Himmel. Der Einfluss der zeitvarianten Satellitenelevation und der Mobilität des Benutzers auf die Kanalsignaturen und damit auch auf die Effizienz von Leistungsregelung, Satelliten-Handover und Satelliten-Diversity wird ebenfalls vollständig modelliert. Die Berücksichtigung dieser wichtigen Zusammenhänge ist mit empirischen Modellen aufgrund der dafür erforderlichen Mengen an Messdaten praktisch nicht möglich. Darüber hinaus bietet ein strahlenoptisches Verfahren eine vorteilhafte Verbindung von hoher Vorhersagegenauigkeit bei moderatem Rechenaufwand.

Durch die Verwendung von ungerichteten Antennen und die Mobilität des Teilnehmers erlangen terrestrische Ausbreitungseffekte (wie Abschattungen und Mehrwegeausbreitung durch Streuzentren in der Nähe des Mobilteilnehmers) besondere Bedeutung. Für L- und S-Band-Systeme sind dies sogar die dominierenden Effekte. Atmosphärische Störungen werden aufgrund ihres sporadischen Auftretens, ihrer langsamen Veränderlichkeit und ihrer statisti-

¹Welcher die relativen Positionen und Geschwindigkeiten der Satelliten berechnet.

schen Natur oft als fixe Beträge in die Leistungsbilanz aufgenommen. Durch die höhere Variabilität der terrestrischen Schwundmechanismen sind diese als die kritischen Faktoren für die Systementwicklung anzusehen. Deshalb beschränkt sich diese Arbeit auf die terrestrischen Effekte. Dadurch, dass atmosphärische und terrestrische Ausbreitungsphänomene generell unkorreliert sind, ist eine separate Betrachtung prinzipiell möglich. Somit können bei Bedarf die entsprechenden atmosphärischen Ausbreitungsmodelle einfach mit dem hier gezeigten Ansatz kaskadiert werden.

Aufgrund ihrer niedrigen Systemkapazität und der höheren Kosten sind zukünftige Satellitenmobilfunksysteme stets als Ergänzung und Erweiterung von terrestrischen Systemen konzipiert. Da letztere vor allem dichtbesiedelte, urbane Gebiete versorgen, konzentriert sich der Anwendungsbereich von Satellitensystemen vorwiegend auf ländliche Gebiete, welche daher auch in dieser Arbeit im Mittelpunkt stehen.

Zur realistischen Simulation der terrestrischen Ausbreitungsphänomene ist eine detaillierte Beschreibung der Umgebung des Mobilteilnehmers notwendig. Kapitel 2 zeigt wie topo- und morphographische Datenbanken mit stochastisch generierten Einzelobjekten kombiniert werden und in Verbindung mit einem Orbitgenerator eine realistische und vielseitige Repräsentation des Ausbreitungsszenarios im Rechner ermöglichen.

Das Ziel, hochauflösende und physikalisch korrekte Zeitserien zu erzeugen, macht eine aufwendige dreidimensionale Wellenausbreitungsrechnung unumgänglich. Um dennoch zu akzeptablen Rechenzeiten zu gelangen, müssen effiziente und für diese Anwendung optimierte Algorithmen zur Strahlsuche gefunden werden (Kapitel 3.1). Kapitel 3.2 zeigt danach auf, wie die elektromagnetischen Parameter jedes Strahls ermittelt werden und welche Besonderheiten der Satellitenmobilfunkkanal aufweist – insbesondere im Vergleich mit den typischen Eigenschaften terrestrischer Ausbreitung.

Durch nachrichtentechnische Auswertung der gewonnenen Daten (Kapitel 4) kann der Funkkanal als zeitvariantes, frequenzselektives Übertragungsglied beschrieben werden. Dies erlaubt schließlich auch eine Verifikation des Ausbreitungsmodells durch den Vergleich mit schmal- und breitbandigen Messungen (Kapitel 5). Dabei werden sowohl über längere Simulationen gemittelte Statistiken (u. a. des Pegels, der mittlere Schwunddauern, der Pegelüberschreitungsraten und der Impulsverbreiterung) als auch polarimetrische Signaturen in speziellen Ausbreitungssituationen verglichen.

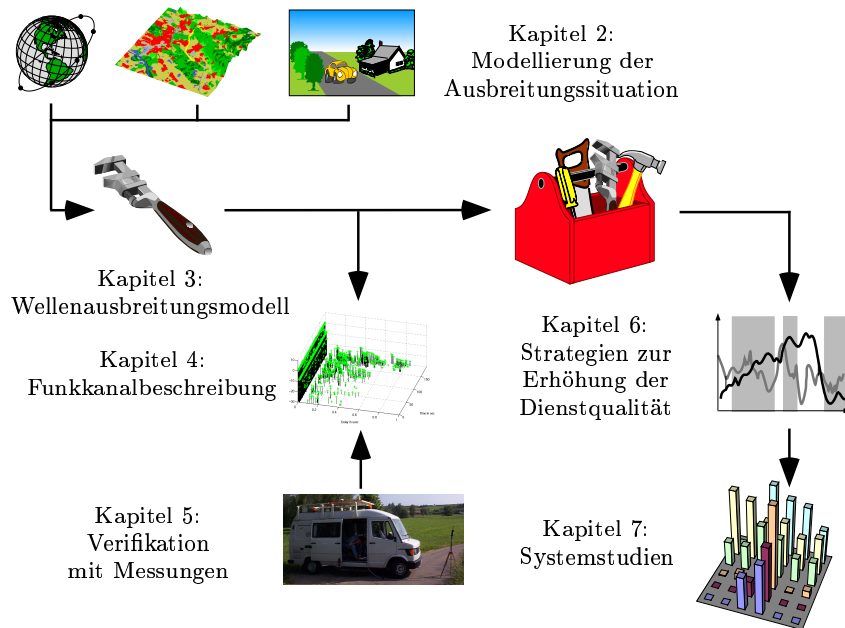


Bild 1.1: Aufbau und Gliederung der Arbeit

Durch geeignete Nachprozessierung der Funkkanaldaten können wichtige Systemaspekte, wie z. B. Signalverzögerung oder Leistungsregelung, berücksichtigt werden und somit verschiedene Strategien zur Erhöhung der Verfügbarkeit des Dienstes (Satelliten-Handover, Satelliten-Diversity und Polarisations-Diversity) untersucht und verglichen werden (Kapitel 6). Die Vorzüge und Anwendungsbereiche des gesamten Ansatzes werden anhand exemplarischer Systemstudien in Kapitel 7 gezeigt. Bild 1.1 veranschaulicht den Aufbau und die Gliederung dieser Arbeit.

Kapitel 2

Modellierung der Ausbreitungssituation

Eine realistische Simulation des Satellitenmobilfunkkanals setzt eine detaillierte Beschreibung der Ausbreitungssituation voraus. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Umgebung des terrestrischen Endgeräts durch Topographie und Landnutzung beschrieben. Relevante Einzelobjekte, wie z.B. Häuser oder Bäume am Straßenrand, werden gesondert berücksichtigt. Zur Erzeugung realistischer Zeitserien ist es ferner nötig, sowohl die Mobilität des Teilnehmers (z.B. Fußgänger, Auto), als auch die Bewegung der Satelliten zu beschreiben. Letzteres geschieht mittels eines sog. Orbitgenerators, welcher die Positionen und die Relativgeschwindigkeiten der Satelliten berechnet. Durch das Zusammenwirken aller Komponenten wird eine detaillierte und vielseitig verwendbare Simulation der Ausbreitungssituation erreicht. Diese ist in der Lage, typische Wechsel von topographischen und morphographischen Gegebenheiten, z.B. während einer Überlandfahrt, zu generieren.

2.1 Verwendete Koordinatensysteme

Zur Beschreibung der Ausbreitungssituation werden die folgenden vier Koordinatensysteme verwendet:

- ein globales geographisches Koordinatensystem (L, B, Z) ,
- ein regionales kartesisches Koordinatensystem (R, H, Z) ,

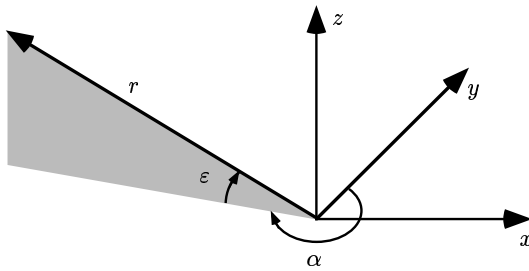


Bild 2.1: Lokale Koordinatensysteme

- ein lokales kartesisches Koordinatensystem (x, y, z) ,
- ein lokales sphärisches Koordinatensystem (r, ε, α) .

Das globale geographische Koordinatensystem (L: Längengrad, B: Breitengrad, Z: Höhe über Normal-Null (NN)) wird benutzt, um den absoluten Beobachtungsstandpunkt auf der Erde festzulegen, welcher u. a. für die Berechnung der Satellitenpositionen durch den Orbitgenerator benötigt wird. Der Weg des Mobilteilnehmers wird durch ein regionales kartesisches Koordinatensystem beschrieben, wie zum Beispiel durch UTM- (engl. *Universal Transversal Mercator*) oder Gauß-Krüger-Koordinaten (R: Rechtswert, H: Hochwert, Z: Höhe über NN). Die beiden lokalen Koordinatensysteme erlauben eine effiziente Implementierung der geometrischen Algorithmen. Bild 2.1 zeigt die Definition der lokalen Koordinatensysteme, welche stets mit dem Mobilteilnehmer mitgeführt werden. Der Ursprung befindet sich im Phasenzentrum der Antenne. Die y -Achse ist zum geographischen Nordpol ausgerichtet, die xy -Ebene befindet sich tangential zur Erdoberfläche. Die Definition des sphärischen Koordinatensystems folgt der geographischen Konvention, welche zur Beschreibung von Satellitenpositionen vorwiegend verwendet wird: Der Azimutwinkel α wird von Norden aus im Uhrzeigersinn gezählt, die Elevation ε ist der Erhebungswinkel gegenüber der xy -Ebene.

2.2 Die Ausbreitungsumgebung

Die Umgebung des Mobilteilnehmers wird durch hochauflösende Höhen- und Landnutzungsdaten mit Rasterschrittweiten zwischen 10 m und 100 m be-

schrieben. Dadurch lassen sich alle flächig ausgedehnten Hindernisse und Streuzentren finden. Allerdings beeinflussen auch einzelne Objekte am Straßenrand, wie z. B. Bäume oder Häuser, die in den obigen Datenbanken nicht enthalten sind, die Übertragung merklich [GV92, Kapitel 2 und 3]. Diese Objekte werden daher stochastisch generiert, wobei die verwendeten Statistiken von der Landnutzungs-kategorie des momentanen Standorts abhängen.

2.2.1 Topographie und Landnutzung

In den digitalen topographischen Daten ist die Höhe der Erdoberfläche bezogen auf Normal-Null (NN) in einem äquidistanten Gitternetz gegeben. Die Landnutzungsdaten enthalten eine Klassifizierung der Beschaffenheit der Erdoberfläche an diesen Punkten. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein speziell für Wellenausbreitungsprobleme erarbeitetes Klassifizierungsschema verwendet [DW99], welches sieben Hauptklassen unterscheidet (siehe auch Anhang A). Durch die offene hierarchische Struktur des Klassifizierungsschlüssels können diese Hauptklassen in beliebig viele Unterklassen aufgeteilt und somit optimal an die vorhandenen Datensätze angepasst werden [DW99].

Bild 2.2 zeigt Topographie und Landnutzung in der Umgebung von Karlsruhe. Dieser Datensatz (Rasterweite 50 m) sowie der ebenfalls eingezeichnete Weg des Mobilteilnehmers („Messfahrt“) wird in später gezeigten Simulationen verwendet.

Eine Datenbank enthält zu jeder Landnutzungs-kategorie die Mittelwerte der elektromagnetischen und statistischen Materialparameter, welche für die Ausbreitungsberechnung benötigt werden. Dies sind:

- die komplexe relative Permittivität $\underline{\epsilon}_r(f)$ beschrieben durch einen Relaxationsansatz (siehe Anhang A),
- eine statistische Beschreibung der Oberflächenrauigkeit durch die Standardabweichung der Höhe σ_r und die Korrelationslänge L_r ,
- die mittlere Schichthöhe h_v der Landnutzungs-kategorie,
- die Parameter ζ , ν und ξ für die Ausbreitung in Vegetationsschichten.

Nähere Erläuterungen zu den in dieser Arbeit benutzten Landnutzungs-kategorien und deren Parameter finden sich in Anhang A.

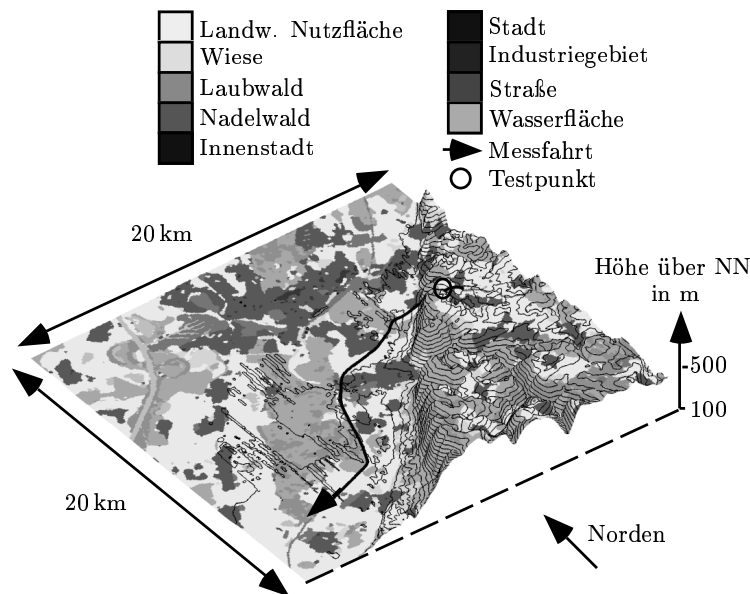


Bild 2.2: Topographie und Landnutzung in der Umgebung von Karlsruhe (Gauß-Krüger-Koordinaten: $R_{min} = 4223590$, $H_{min} = 5418660$)

2.2.2 Statistische Generierung von Hindernissen

Einzelne Objekte in der unmittelbaren Umgebung des Mobilteilnehmers sind in den obigen Datenbanken nicht enthalten, führen jedoch oft zu Abschattungen und beeinflussen das Übertragungsverhalten merklich [GV87]. Deshalb werden einzelne Bäume oder Häuser am Straßenrand synthetisch generiert. Ein stochastischer Prozess approximiert diese Hindernisse durch Quader mit statistisch variierender Objektdichte, Abstand zum Mobilteilnehmer, Ausdehnung und Höhe über Grund. Die verwendeten Verteilungsfunktionen und deren Parameter sind von der aktuellen Landnutzungs-kategorie am Ort des Mobilteilnehmers abhängig. Während z. B. in bewaldeten oder bebauten Gebieten eine hohe Dichte von Bäumen bzw. Häusern modelliert wird, sind die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für offenes Gelände deutlich reduziert. Die verwendeten Parameter (Verteilungsfunktion, Mittelwert, Standardabweichung, obere und untere Grenze) basieren auf Angaben aus der Literatur [DMB95], [Dos95, Anhang 1] und sind im Anhang B aufgeführt. Als Re-

sultat dieses stochastischen Prozesses liegen die Koordinaten der Eckpunkte, die Höhe, sowie der Objekttyp (z.B. Baum, Gebäude) vor. Diese Objekte werden im Folgenden mit „3D-Objekte“ bezeichnet.

2.2.3 Der Mobilteilnehmer

Der Weg des Mobilteilnehmers wird in regionalen kartesischen Koordinaten $\vec{G}_m(t_i)$ angegeben, wobei jedem Punkt eine Simulationszeit t_i zugeordnet ist, welche vom Orbitgenerator benutzt wird, um die aktuellen Satellitenpositionen zu berechnen. Ferner können dadurch unterschiedliche Bewegungsgeschwindigkeiten simuliert werden. Die Koordinaten R_i , H_i und die Zeitpunkte t_i können entweder Messfahrten entnommen werden oder anhand von einigen benutzerdefinierten Stützstellen synthetisch durch ein Vorverarbeitungsmodul mit beliebiger Schrittweite interpoliert werden. In einem weiteren Arbeitsschritt wird die Höhe über Meeresspiegel Z_i aus der vorgegebenen Antennenhöhe über Grund h_a und den topographischen Daten ermittelt. Damit wird eine in sich konsistente Beschreibung der Ausbreitungsumgebung erreicht.

2.3 Die Satellitensysteme

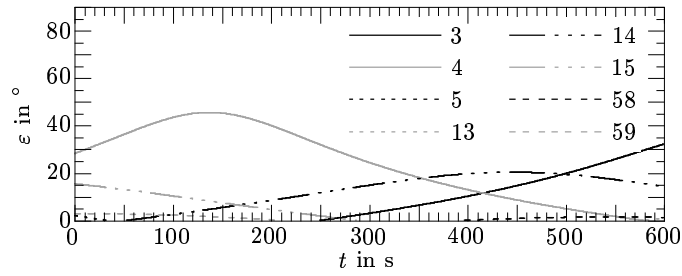
In der Satellitenmobilkommunikation werden vorwiegend niedrige Umlaufbahnen verwendet, was zur Folge hat, dass sich die Satelliten in einer Relativbewegung zu einem Fixpunkt auf der Erde befinden. Neben elliptischen Bahnen (HEO, engl. *highly elliptical orbit*) werden vor allem zirkuläre Orbits verwendet. Dabei unterscheidet man je nach Bahnhöhe h_S folgende Konstellationstypen:

- LEO (engl. *low earth orbit*): $h_S = 500 \text{ km} \dots 2000 \text{ km}$,
- MEO (engl. *medium earth orbit*): $h_S = 5000 \text{ km} \dots 25000 \text{ km}$,
- GEO (engl. *geostationary orbit*): $h_S = 35786 \text{ km}$.

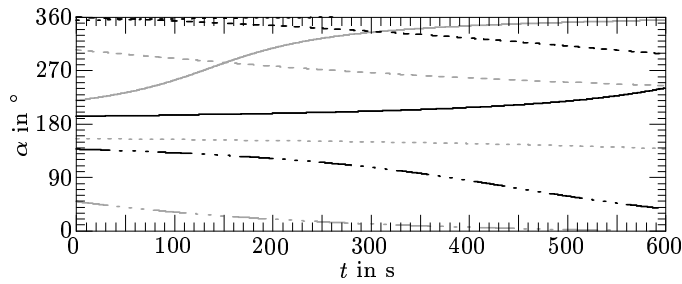
Tabelle 2.1 zeigt einen Vergleich der Umlaufzeiten und der Zeiten der Sichtbarkeit von einem festen Beobachtungspunkt auf der Erde für verschiedene Bahnhöhen [BLJ⁺96, Kapitel 2].

Tabelle 2.1: Zirkulare Orbittypen

Orbit	Bahnhöhe	Umlaufzeit	Sichtbarkeit
LEO	780 km	1 h 40 min	11 min
MEO	10350 km	5 h 59 min	1 h 37 min
GEO	35786 km	23 h 56 min	∞



a)



b)

Bild 2.3: Zeitvariante Positionen der Satelliten eines LEO-Systems, a): Elevation ε und Legende der Satelliten-Nummern, b): Azimut α

Der Orbitgenerator berechnet anhand der Konstellationsdaten für jeden Zeitpunkt t_i die Anzahl n_S der Satelliten, die sich in der oberen Hemisphäre des lokalen sphärischen Koordinatensystems befinden. Für jeden dieser Satelliten S werden die aktuellen Koordinaten $\vec{x}_S(t_i)$ sowie die zugehörigen Relativgeschwindigkeitsvektoren $\vec{v}_S(t_i)$ ermittelt [IMS98, Teil 3].

Als Beispiel sind in Bild 2.3 die zeitlichen Verläufe der Elevation ε und des Azimuts α der sichtbaren Satelliten eines typischen LEO-Systems für das Szenario in Bild 2.2 dargestellt. In der 10 Minuten dauernden Simulation ist deutlich das Auf- und Absteigen der Satelliten zu erkennen. Die – bereits innerhalb einer normalen Gesprächsdauer – variierende Elevation spielt eine maßgebliche Rolle für die Verbindungsqualität.

Durch die Wahl geeigneter Konstellationsparameter können sowohl Systeme mit Mehrfach-sichtbarkeit und variierenden Aspektwinkeln der Satelliten, als auch einzelne Satelliten mit fixem Azimut- und Elevationswinkel simuliert werden. Dies erlaubt sowohl die Untersuchung der Verfügbarkeit von Gesamtsystemen, als auch gezielte Ausbreitungsstudien für bestimmte Satellitenelevationen. Darüber hinaus ist auch die Berechnung von Flugzeugbahnen möglich, welche zum Vergleich mit Messungen benötigt werden.

2.4 Zusammenfassung

Das Zusammenwirken aller Komponenten, welche die Ausbreitungssituation beschreiben, ist exemplarisch in Bild 2.4 dargestellt. Dort ist eine Rundumansicht aus der Perspektive der Antenne des Mobilteilnehmers abgebildet. Die x -Achse zeigt den Azimutwinkel α' bezogen auf die momentane Fahrtrichtung; die y -Achse entspricht dem Elevationswinkel. Für einen Zeitpunkt $t_i \approx 60\text{ s}$ (in Bild 2.2 als Testpunkt bezeichnet) einer fiktiven Fahrt auf der Autobahn A8 zwischen Karlsbad und Kreuz Karlsruhe sind die momentanen Satellitenpositionen als schwarze Sterne dargestellt. Momentan sind vier der insgesamt 66 Satelliten des LEO-Systems aus Bild 2.3 vom Benutzer aus sichtbar. Die Kurven stellen die Umrisse der Hindernisse dar, welche durch Topographie, Landnutzung oder durch synthetisch generierte, einzelne Bäume und Häuser am Straßenrand verursacht werden. Zu diesem Zeitpunkt besteht Sichtverbindung zum Satelliten Nr. 4, welcher die höchste Elevation aufweist. Satellit Nr. 15 befindet sich gerade an der Schattengrenze einer Hügelkette und ist außerdem durch Bäume am Straßenrand abgedeckt. Die beiden anderen Satelliten gehen gerade am Horizont auf bzw. unter.

Während die Abschattungen durch Topographie und Landnutzung langsam veränderlich sind, wechseln die relativen Positionen der Hindernisse am Straßenrand rasch. Zusammen mit den zeitvarianten Satellitenpositionen für nicht-geostationäre Satellitensysteme und der sich ständig ändernden Bewegungsrichtung des Mobilteilnehmers ergibt sich eine dynamische Abfolge von

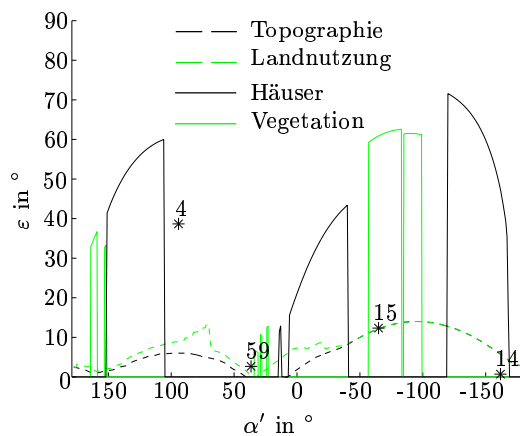


Bild 2.4: Momentanes Elevationspanorama aus der Perspektive der Teilnehmerantenne

unterschiedlichen Ausbreitungssituationen, die der Realität sehr nahe kommt und sich merklich von bisher üblichen, groben Beschreibungen der Ausbreitungsumgebung (z. B. „offenes Gelände“, „flach“, „hügelig“) unterscheidet.

Die hier beschriebene Modellierung der Umgebung stellt darüber hinaus eine schnelle und effiziente Alternative zu einem bisher zur Charakterisierung der Ausbreitungssituation verwendeten photographischen Verfahren dar. Dabei werden auf Messfahrten Rundumansichten – ähnlich zu Bild 2.4 – mittels Fischaugenobjektiven aufgenommen, perspektivisch korrigiert, statistisch ausgewertet und zu empirischen Ausbreitungsmodellen weiterverarbeitet [AV97]. Der hier beschriebene Ansatz erzeugt den gleichen Detaillierungsgrad in der Beschreibung des Ausbreitungsszenarios vollautomatisch und mit erheblich weniger Aufwand.

Durch diese detaillierte Beschreibung der näheren Umgebung des Teilnehmers sind die Grundlagen und Voraussetzungen für eine strahlenoptische Modellierung des Funkkanals gegeben. Die Vorprozessierung dieser Daten, die Suche der relevanten Ausbreitungspfade und schließlich die Berechnung der elektromagnetischen Parameter der Strahlen wird im folgenden Kapitel näher beleuchtet.

Kapitel 3

Strahlenoptisches Wellenausbreitungsmodell für den Satellitenmobilfunk

Zur Berechnung hochauflösender Zeitserien von Kanalimpulsantworten bietet sich eine strahlenoptische Modellierung an. Diese Methode ermöglicht im GHz-Bereich sehr genaue Vorhersagen der Kanaleigenschaften bei vertretbarem Rechenaufwand. Darüber hinaus ist durch den physikalisch-theoretischen Ansatz ein breites Anwendungsgebiet bezüglich der Frequenz und der Ausbreitungsgebung gegeben. Im Gegensatz zu empirischen Modellen ist es ferner möglich, den reinen Übertragungskanal von Einflüssen des Übertragungssystems zu trennen. Somit werden gezielte Systemparameterstudien (z.B. Variation der Übertragungsbandbreite, der verwendeten Filter, der Signalverzögerung oder der Antennenrichtcharakteristiken) bei konstanten Ausbreitungsbedingungen möglich.

Eine strahlenoptische Ausbreitungsmodellierung gliedert sich in zwei Hauptaufgaben: Zunächst ist das geometrische Problem der Suche nach gültigen Ausbreitungspfaden zu lösen (Kap. 3.1), danach erfolgt die Bestimmung der Parameter jedes Pfades (u. a. der Ausbreitungsdämpfung, der Polarisierung, der Laufzeit, der Dopplerverschiebung und der Einfallswinkel am Mobilteilnehmer) mittels geeigneter physikalischer Modelle (Kap. 3.2).

3.1 Suche der Ausbreitungspfade

In einem strahlenoptischen Wellenausbreitungsmodell wird das elektromagnetische Feld durch direkte, reflektierte, gebrochene, sowie (in Erweiterung der eigentlichen geometrische Optik) durch gebeugte Strahlen beschrieben. Die Strahlenbahnen folgen allgemein dem Fermat'schen Prinzip [MPM90, Kapitel 2]. Für homogene Materie ergeben sich geradlinige Ausbreitungspfade. Zur Bestimmung der Existenz und der exakten Geometrie dieser einzelnen Strahlen muss untersucht werden, welche Objekte in der Umgebung des Mobilteilnehmers die direkte Sichtverbindung behindern bzw. welche durch Reflexion, Streuung oder Beugung zu Mehrwegeausbreitung führen. Dazu müssen zunächst alle von der Antenne des mobilen Endgeräts aus sichtbaren Teile der vorhandenen Objekte ermittelt werden, bevor dann die eigentliche Strahlgeometrie berechnet wird.

Wie in den Kapiteln 3.2.4 und 5.1 gezeigt wird, ist für Systemplanungsaufgaben eine dreidimensionale Wellenausbreitungsrechnung unabdingbar. Aufgrund der Komplexität einer solchen dreidimensionalen Ausbreitungspfad-suche ist eine effiziente Berechnung der sichtbaren Kanten, Ecken und Flächen von höchster Priorität. Der einfachste denkbare Algorithmus besteht darin, dass für jede Strecke vom Mobilteilnehmer zu einem Eck- oder Kantenpunkt die Existenz einer Sichtverbindung durch Schnittpunktsuche mit allen n vorhandenen Objekten durchgeführt wird. Dieses Verfahren weist eine Komplexität der Ordnung $O(n^2)$ auf, was sehr schnell zu einem nicht mehr vertretbaren Rechenzeitaufwand führt.

Die Möglichkeit einer dreidimensionalen Ausbreitungsrechnung entsteht somit erst durch optimierte geometrische Verfahren, wie dem in dieser Arbeit weiterentwickelten und auf die spezielle Problematik angepassten sog. Sweep-Line Algorithmus [BMN97, APF97]. Die Grundform dieses Algorithmus weist einen Aufwand von $O((n + k) \log n)$ auf, wobei k die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Schnittpunkte bezeichnet [SDK96, Kapitel 2]. Für günstige Anwendungen, wie die hier vorliegende, in denen zwar viele Objekte vorkommen, aber nur wenige Schnittpunkte existieren, wird somit ein erheblich besseres Zeitverhalten erreicht.

In dieser Arbeit wird eine abgewandelte und für die vorliegende Aufgabe optimierte Form des Sweep-Line Algorithmus vorgestellt. Die nächsten Abschnitten zeigen die wesentlichen Verarbeitungsschritte auf.

3.1.1 Projektion der Objekte am Straßenrand

In die dreidimensionale Suche der Ausbreitungspfade werden alle 3D-Objekte in unmittelbarer Umgebung des Mobilteilnehmers einbezogen. Eine erste Reduktion der Problemkomplexität wird durch eine Projektion in den zweidimensionalen Raum erreicht. Das Projektionszentrum ist die aktuelle Position der Mobilteilnehmerantenne. Alle 3D-Objekte werden auf vier zur xy -Ebene senkrecht stehende, orthogonale Halbebenen projiziert, welche alle den gleichen Abstand d_p zum Mobilteilnehmer haben (Bild 3.1). Der Abstand d_p muss groß genug gewählt werden, um eine hinreichende numerische Auflösung aller 3D-Objekte im Bildbereich zu erhalten. Der Vorteil dieser planaren Projektion liegt darin, dass die senkrechten Kanten vertikal bleiben, weshalb lediglich die Oberkanten der Objekte weiterverarbeitet werden müssen. Da auch die Linearität der Oberkanten erhalten bleibt, genügt es, die Eckpunkte zu projizieren.

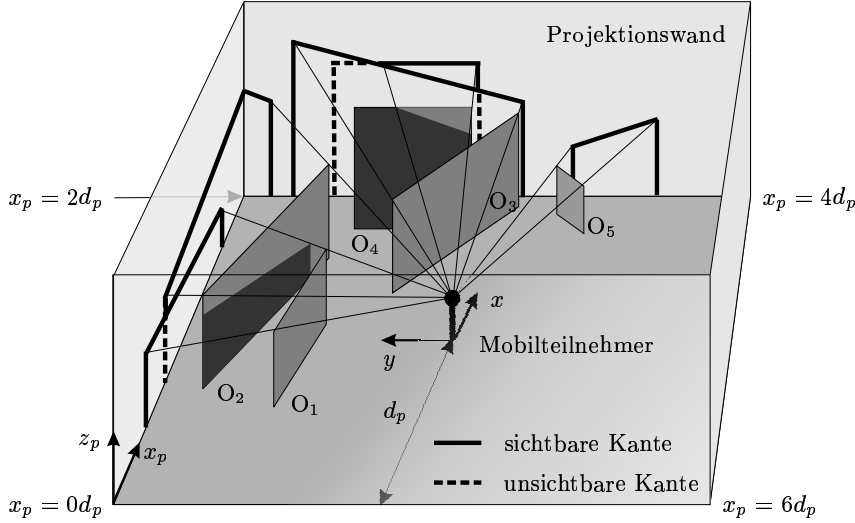


Bild 3.1: Projektion der 3D-Objekte im Nahbereich

Für jeden Eckpunkt der 3D-Objekte wird folgende Abbildungsvorschrift verwendet:

$$(x_p, z_p) = P\{(x, y, z)\} = \left(\frac{k_s}{k_m} d_p + d_0, \frac{z}{k_m} d_p \right) \quad (3.1)$$

mit

$$(k_m, k_s) = \begin{cases} (y, x) & \forall \quad |y| > |x| \\ (x, -y) & \forall \quad |y| \leq |x| \end{cases} \quad (3.2)$$

$$d_0 = \begin{cases} d_p & \forall \quad |y| > |x| & \& \quad y > 0 \\ 3d_p & \forall \quad |y| \leq |x| & \& \quad x > 0 \\ 5d_p & \forall \quad |y| > |x| & \& \quad y \leq 0 \\ 7d_p & \forall \quad |y| \leq |x| & \& \quad x \leq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Dadurch ergibt sich ein Bildbereich, bei dem die x_p -Koordinate entlang der Grundlinie der aufgeklappten vier Würfelflächen gezählt wird und dabei in einem Umlauf einen kontinuierlichen Wertebereich von $x_p \in [0, 8d_p)$ überstreicht. Die Koordinate z_p entspricht der Höhe eines fiktiven Schattenwurfs der projizierten Objekte. Bild 3.1 zeigt beispielhaft fünf 3D-Objekte und deren Projektion. Im Folgenden wird derjenige Eckpunkt einer Objektoberkante, welcher die kleinere x_p -Koordinate besitzt, als Startpunkt bezeichnet, der andere als Endpunkt.

Für Kanten, deren Abbildung sich über mehrere Projektionswände erstreckt, werden an den Schnittstellen zweier Projektionswände zusätzliche Stützpunkte eingeführt (z. B. bei $x_p = 2d_p$ für Objekt O_2 in Bild 3.1). Dies ist nötig, da sich an diesen Stellen die Steigung der projizierten Geraden ändert (vgl. auch Bild 3.2).

Alle weiteren Verarbeitungsschritte basieren auf den nach steigender x_p -Koordinate sortierten Bildpunkten der Objektecken. Zu jedem Bildpunkt existiert ein x_p -Eintrag, welcher außer seinen Koordinaten auch die Koordinaten des zugehörigen zweiten Eckpunkts, den Abstand zum Mobilteilnehmer, eine Objektkennung sowie weitere später benötigte Daten enthält.

3.1.2 Der modifizierte Sweep-Line Algorithmus

Anhand der projizierten Eckpunkte können alle Punkte bestimmt werden, an denen sich die Sichtbarkeit von Objekten ändert. Dies ist nur an deren Start- und Endpunkt, bzw. an Schnittpunkten der projizierten Objektkanten möglich. Der Sweep-Line Algorithmus stellt ein Hilfsmittel dar, diese Schnittpunkte schnell zu bestimmen. Die Grundidee besteht darin, alle x_p -Einträge sukzessiv abzuarbeiten. Das bereits durch die Projektion auf zwei Dimensionen reduzierte Problem wird dabei weiter zu einer dynamischen Abfolge von

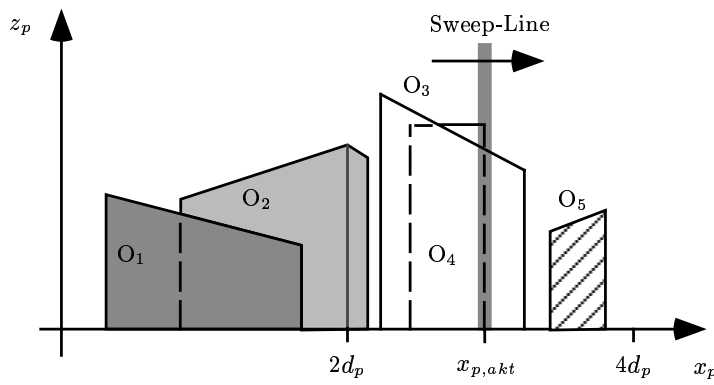


Bild 3.2: Die verschiedenen Objekttypen im Bildbereich

quasi-eindimensionalen Betrachtungen vereinfacht. Durch die sog. Sweep-Line, d. h. der momentan betrachteten Linie mit $x_{p,akt} = \text{const}$, werden die Objekte in drei Untermengen aufgeteilt [SDK96]:

- vollständige abgearbeitete Objekte, deren Endpunkt bereits gefunden wurde,
- aktive Objekte, bei welchen bereits der Startpunkt gefunden wurde, jedoch noch nicht der Endpunkt,
- „schlafende“ Objekte, deren Startpunkt noch nicht überstrichen wurde.

Bild 3.2 zeigt den Bildbereich der fünf Objekte aus Bild 3.1. Für eine Bestimmung der Sichtbarkeit am Punkt $x_{p,akt}$ (Endpunkt des Objekts O_4 in Bild 3.2) genügt es, die momentan aktiven Objekte O_3 und O_4 zu betrachten (weiße Objekte in Bild 3.2). Die grau gezeichneten Objekte O_1 und O_2 wurden bereits vollständig abgearbeitet, während O_5 (schraffiert) noch zu den „schlafenden“ Objekten gehört.

Zu Beginn besteht die Liste der x_p -Einträge nur aus den Einträgen der Start- und Endpunkte der Objekte. Nur falls mehrere Objekte aktiv sind, müssen die zugehörigen Oberkanten auf eventuelle Schnittpunkte untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Schnittberechnungen werden gespeichert, um eine

mehrfache Untersuchung gleicher Objekte zu vermeiden. Falls ein Schnittpunkt gefunden wird, wird dieser in die geordnete Liste der x_p -Einträge einsortiert. Durch sukzessives Abarbeiten dieser Liste gelingt es, alle Schnittpunkte zu finden und für jede x_p -Koordinate eine nach steigendem z_p sortierte Liste der aktiven Objekte zu erzeugen [BMN97]. Durch dieses strukturierte Vorgehen ergibt sich eine wesentlich verringerte Anzahl an Schnittberechnungen, was eine erhebliche Rechenzeitreduktion mit sich bringt. Es resultiert eine zweidimensionale verkettete Liste von Objekten (im Folgenden xz -Struktur genannt), deren Aufbau in Bild 3.3 skizziert ist. Dabei wurde wiederum das Beispiel aus Bild 3.1 gewählt. Von links nach rechts ergeben sich folgende Ereignisse, die zu einem x_p -Eintrag geführt haben: Startpunkt O_1 , Startpunkt O_2 , Endpunkt O_1 , Verbindungspunkt O_2 , Endpunkt O_2 , Startpunkt O_3 , Startpunkt O_4 , Schnittpunkt $O_3 \cap O_4$, Endpunkt O_4 , Endpunkt O_3 .

Der nächste Schritt besteht nun darin, aus der xz -Struktur die sichtbaren (Teil-)Objekte sowie die Interaktionspunkte der verschiedenen Ausbreitungspfade mit den 3D-Objekten zu identifizieren.

3.1.3 Bestimmung der Interaktionspunkte

Zur Bestimmung der Sichtbarkeit von Objekten wird die xz -Struktur spaltenweise abgearbeitet. Anhand der jeweiligen z_p -Koordinaten und den Abständen zum Mobilteilnehmer werden vier Sichtbarkeitszustände unterschieden:

$S = 0$: unsichtbarer Punkt,

$S = 1$: sichtbarer Punkt innerhalb der Kante (Stützpunkt),

$S = 2$: sichtbarer Eckpunkt der Kante,

$S = 3$: Anfang bzw. Ende der Sichtbarkeit einer Kante aufgrund von Abschattung durch bzw. Schnitt mit einem anderen Objekt.

Die unsichtbaren Punkte ($S = 0$) spielen für die weitere Verarbeitung keine Rolle. Sichtbare Stützpunkte ($S = 1$) beschränken die vertikale Sichtbarkeit anderer Objekte. Einträge mit $S = 2$ bilden sowohl Grenzpunkte des sichtbaren Bereichs von horizontalen und vertikalen Kanten, als auch Interaktionspunkte für Eckenbeugung, wohingegen $S = 3$ lediglich einen Grenzpunkt